



21-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
 vykusios 2018 m. gegužės 4-5 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 21th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 4-5 May 2018, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 21-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 4-5 мая 2018 г., Вильнюс, Литва

## ИССЛЕДОВАНИЯ ФАКТОРОВ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО РАСТВОРА С РЕЗИНОВЫМ ПОРОШКОМ НА ОСНОВЕ ТЕКУЧЕСТИ

<sup>1</sup>Хэ Юйлинь, <sup>2</sup>Лю Цзиньхань, <sup>1</sup>Октябрина Чемакина, <sup>1</sup>Андрей Белятинский, <sup>1</sup>Валерий  
 Першаков, <sup>1</sup>Иванна Мартыненко

<sup>1</sup>Национальный авиационный университет, Киев, Украина

<sup>2</sup>Шичзячжуанский железнодорожный университет, Шичзячжуан, Китай

E-mail: <sup>1</sup>popovich\_ivanna1992@ukr.net

**Аннотация.** Большое количество отечественных и зарубежных материалов исследований показывают, что: «Резиновый порошок использованных автомобильных покрышек, применяемый в строительных материалах, может проявлять множество полезных свойств, придает строительным материалам целый ряд свойств композитных материалов». Однако, из-за особенностей материала и структуры резинового порошка, включение резинового порошка в строительные материалы может вызвать некоторые вредные воздействия. В этой статье в качестве факторов исследования применялись: дозировка (с содержанием 2%, 4%, 6% и 8% порошка) размер частиц в 20 меш, 60 меш, 80 меш и 120 меш, модификаторы (модифицированные NaOH), создавались экспериментальная и контрольная группы. На основе текучести была проверена прочность на изгиб бетонных компонентов 3d, 7d и 28d трех возрастных периодов. При сочетании анализа изображений влияния дозировки и зернистости на текучесть можно промышленно производить с хорошими механическими свойствами и рабочими характеристиками материалы с содержанием резинового порошка на цементной основе.

**Ключевые слова:** цементный раствор, резиновый порошок, текучесть, механическая прочность, строительные материалы.

### Введение

**Постановка проблемы.** В ходе стремительного развития общества транспорт играет все более важную роль в жизни людей, а количество автомобилей в мире возрастает с огромной скоростью. Согласно статистическим данным соответствующих ведомств, мировое производство шин составляет около 1,5 млрд. тонн в год, а ежегодное количество использованных шин – около 4,5 млрд. тонн. И каждая выброшенная шина по отношению к автомобилю превращается в «отходы» (Samar *et al.* 2016).

### Цель статьи

Применение порошка резины в инженерных материалах может решить проблему эффективного повторного использования большого количества отработанных шин. В этой статье проведено экспериментальное исследование модифицированного NaOH резинового порошка и не модифицированного резинового порошка, с помощью равнообъемного метода смешивания и

замены песка, в сочетании с текучестью резинового цементного раствора и корреляцией его механических свойств.

Отработанные шины представляют собой тугоплавкий полимерный эластичный материал, который нелегко перерабатывается, и для разложения в почве для которого требуются десятилетия, сжигание которого может привести к серьезному загрязнению воздуха. Отработанные шины являются проблемой «черного загрязнения» для всех стран мира. В большинстве случаев шины, которые были выброшены, не достигли конца срока их полезного использования, а ресурсы, необходимые для производства шин, слишком велики. Если использованные шины непосредственно выбрасывать в окружающую среду, то это приведет не только к чрезмерному расходу ресурсов, но и серьезному загрязнению окружающей среды. Поэтому с середины 20-го века переработка отброшенных шин путем модификации и переработки для получения резины и/или высокоуглеродистых продуктов стала предметом изучения ученых, конечно же, ее

применение в строительных материалах также стало популярным исследованием в рамках дисциплины строительства.

### Анализ научных работ, выполненных в исследуемой области

Согласно существующим исследованиям, показано, что добавление резинового порошка в бетон цементного раствора может эффективно уменьшить усадку бетона, улучшить его вязкость, ударную стойкость, усталостную прочность, морозостойкость и другие свойства (Linhu 2010). В то же время, из-за особенностей резинового порошка, его прочность и модуль упругости значительно снижаются, поэтому резиновый порошок отработанных шин в качестве заполнителя бетона нового типа привлекает внимание специалистов и ученых из большого количества стран мира, которые проводят обширные исследования в этой области (Samar 2016; Ali *et al.* 2008; Mansour *et al.* 2016; Linhu 2010; Shaowen *et al.* 2009; Herna'ndez *et al.* 2002).

Юй Лиган (Ligang 2010; Ligang, Lan 2010), Сюй Хунинь (Hongyin *et al.* 2015) и др. проводили углубленные экспериментальные исследования различных модифицированных видов цементного раствора с добавлением резинового порошка. Ван Хайлун и др. (Hailong *et al.* 2015; Jinhan *et al.* 2016) провели большое количество экспериментальных исследований по модифицированному и не модифицированному бетону, получаемого из раствора с добавлением резинового порошка с различным размером частиц и дозировками. Исследования показали, что дозировка, размер частиц и эффект модификации влияют на механические свойства бетона. Существующие результаты исследований в основном сосредоточены на отдельно взятых макроскопических свойствах бетона с добавлением резинового порошка, и не связаны с рабочими характеристиками, требуемыми фактическими потребностями строительно-монтажных работ, а исследований, связанных с механизмами влияния, сравнительно немного (Kunlin *et al.* 2014). Необходимо проведение системных и глубоких исследований, связанных с оптимизацией использования размеров частиц и дозировкой использованной резины, предварительной обработкой частиц резины, типами цемента, химическими и минеральными примесями и другими аспектами, проведение системных исследований механизмом влияния (Yanrong *et al.* 2014).

### Основная часть

В качестве цементного материала был выбран Jidong PO 42.5 обычный портландцемент; резиновый порошок фабрики Tangshan Haiwei; модификатор окисления с сильным эффектом окисления сильного щелочного гидроксида натрия (NaOH); мелкозернистого заполнителя с модулем тонкости песка 2,55 речного песка второго района, кажущаяся плотность 2546 кг/м<sup>3</sup>; вода качества водопроводной воды в Хухэха-отхэ.

В процессе модификации резинового порошка, гранулы аналитического модификатора помещали в ведро с раствором NaOH 5%, 10%, 15% концентрации, затем тщательно перемешивали с резиновым порошком. После замачивания в течении 30 мин, промывали водой несколько раз и затем помещали в сушильную печь при 70°C, высушивали до плоскости насыщения. Затем ее функциональные группы испытывали с помощью инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (FTIR) и анализировали. В то же время производили эксперимент текучести трех видов концентрации модифицированных резиновых порошков в цементе, а затем проводили анализ.

Цементный раствор соответствовал с JGJ/T70-2009 «Стандартам методов испытаний базовых характеристик для строительных растворов». Испытывались прочность на изгиб 3d, 7d, 28d и текучесть свежего раствора.

### Анализ испытаний.

Модифицированный анализ резиновых порошков:

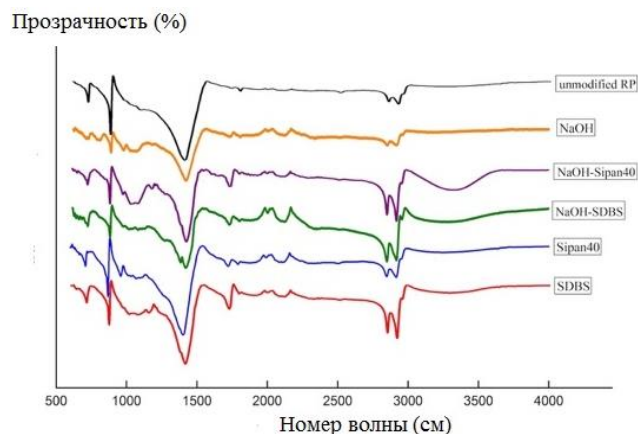
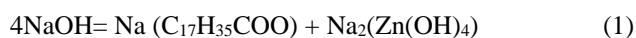


Рис.1. Различные модифицированные порошки на основе инфракрасного спектра

Инфракрасный спектральный анализ проводился спектрометром с инфракрасным излучением MAGNA-IR760. С помощью инфракрасной спектроскопии, для тестирования химических функциональных групп, поглощаемых на поверхности резинового порошка, проверялся инфракрасный спектр на поверхности резинового порошка и качественный анализ модификации поверхности резинового порошка. Результаты испытаний показаны на рис. 1.

Наблюдая инфракрасные спектры каждого из порошков на рис. 1, можно обнаружить, что общая конфигурация пяти методов модифицированных и не модифицированных спектров порошка одинакова, без значительных изменений в положениях нескольких сильных пиков поглощения. В процессе производства резины часто необходимо добавлять добавки, такие как стеарат цинка. Химическая формула стеарата цинка ( $C_{17}O_{35}COO$ )  $_2 Zn$ , которая позволяет вступать в реакцию с кислотой и щелочью. Существующие исследования показывают, что стеарат цинка является основной причиной снижения силы связыва-

ния между частицами резины и цементного камня. Замачивание резиновых частиц раствором NaOH может убирать стеарат цинка с поверхности частиц резины, уравнение химической реакции следующее:



Это доказывает, что после обработки раствором NaOH, с поверхности резинового порошка удаляются стеарат цинка и другие примеси, что стирол-бутадиеновый каучук, содержание которого незначительно в резинового порошке, и бутадиеновый каучук выходят наружу. После обработки резинового порошка NaOH на поверхности в основном не изменяется химический состав порошка, но благодаря его сильной коррозионной активности происходит обработка примесей на поверхности. Модификатор оказывает стимулирующее влияние на текучесть каучукового цемента, и, следовательно, текучесть модифицированной группы больше, чем стандартной группы.

### Анализ механизма

Анализ разности уровня ортогональных факторов. В отношении четырех уровней размеров частиц резины, дозировки и метода двух уровней модификации, в соответствии с L16 ( $42 \times 29$ ), исследовали влияние вышеуказанных трех факторов на рабочие характеристики цементного раствора, модифицированного резиновым порошком (текучесть) и механические свойства.

Использовали метод анализа диапазона для анализа вышеуказанных проблем, горизонтальный дизайн ортогонального фактора и экспериментальные результаты.

С помощью анализа диапазона результатов ортогональных испытаний, мы можем легко перейти к влиянию на удельный вес модификации, дозировки, размера частиц по отношению к текучести цементного раствора с резиновым порошком и прочности на изгиб.

Факторами, влияющими на текучесть от максимума до минимума, являются: доза > размер частиц > модификация. Это связано со значением текучести и количеством воды, вяжущего материала и заполнителя, соотношением между собой и свойствами составляющих материалов, что соответствует цементному раствору с резиновым порошком, подразделяющимся на водное склеивание и песчаное склеивание (Mingli *et al.* 2016).

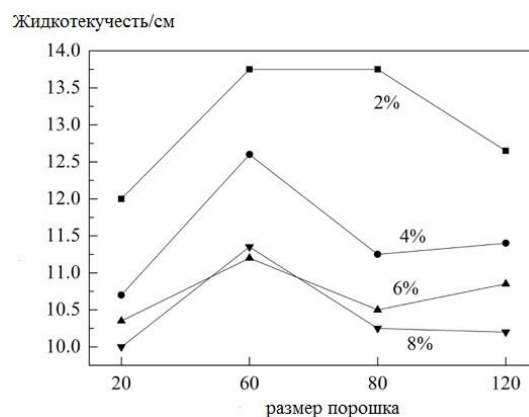
При увеличении объема смазывающий эффект цементного раствора ослабляется, что оказывает наибольшее влияние на текучесть. В той же дозировке, при уменьшении количества меш резинового порошка, объем слегка увеличился, увеличение удельной поверхности и снижение смазывающего эффекта цементного раствора были не такими очевидными, как изменение дозировки. Объем и удельная площадь поверхности модифицированного резинового порошка не сильно изменились. Изменения состояния по-

верхности вызвали изменения в гидрофильности, оказывая минимальное влияние на текучесть.

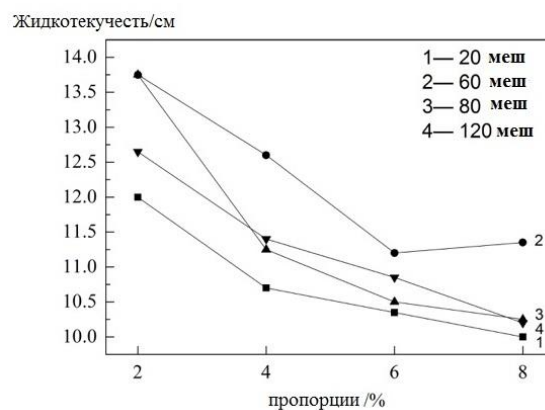
Факторы, влияющие на прочность на изгиб по мере убывания, следующие: дозировка > модификация > размер частиц. Это связано с тем, что резиновый порошок является инертным материалом, прочность его соединения с поверхностью цементного раствора намного меньше, чем песка. В процессе формирования образцов, большое количество воды участвовало в гидратации цемента, а гидрофильность модифицированных резиновых частиц повышалась. Это увеличило эффект гидратации цемента на поверхности резинового порошка, усилило обвертывание резинового порошка цементным раствором, поэтому вес его влияния на прочность на изгиб бетона больше, чем у диаметра частиц. Смешивание и объем смешивания резинового порошка непосредственно влияет на состав коэффициента заполнителя. Следовательно, он обладает самым высоким весом.

### Анализ текучести в связи с размером частиц и дозировкой

Зависимость текучести раствора, смешанного с различными дозами резинового порошка, от размера частиц, показана на рис. 2 (а), а зависимость размера частиц резинового порошка цементного раствора от изменений параметров, показана на рис. 2 (б).



а)



б)

Рис. 2а и рис. 2б: Графики анализа систематизированных экспериментальных данных не прошедших модификацию резиновых частиц.

Как видно из рис. 2 (а), текучесть резинового порошкового цемента отрицательно коррелирует с параметрами резины, и текучесть постепенно уменьшается с увеличением параметров. Когда равный объем резинового порошка заменяет 2% массы, достигается наибольшее значение текучести цементного раствора при различных размерах частиц резинового порошка (четыре размера частиц показывают согласованную закономерность). Из рис. 2 (б) видно, что текучесть раствора в одной и той же дозе увеличивается с увеличением числа меш, а текучесть сначала увеличивается, а затем уменьшается. Когда размер частиц резинового порошка составляет 60 меш, текучесть каждой дозы достигает максимума (четыре дозы показывают согласованную закономерность).

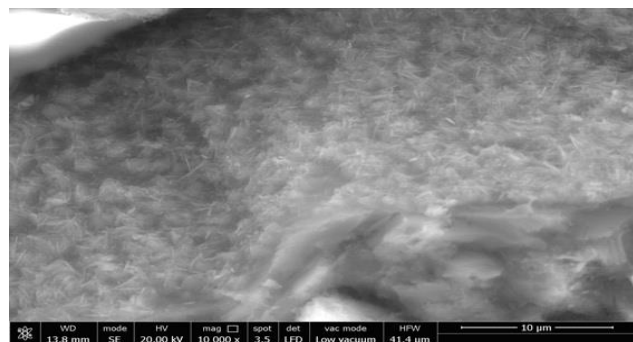
Вышеуказанные закономерности размера частиц, параметров и текучести раствора могут быть объяснены разницей между резиновым порошком и песком: удельная площадь поверхности частиц резины является важным фактором, влияющим на текучесть бетона на основе цементно-резинового раствора. Согласно формуле удельной площади поверхности:

$$\frac{s}{v} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{Rv} \quad (2)$$

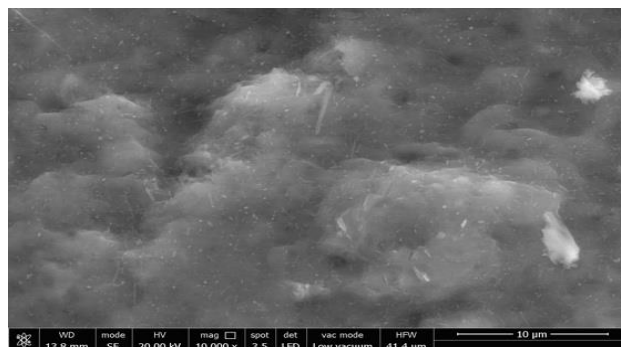
где:  $s$  – удельная поверхность частицы;  $v$  – объем частиц в дисперсной фазе;  $Rv$  – стандартная величина резиновых частиц, стандартный радиус резиновых частиц 60-меш  $Rv = 1$ , а больше 60 меш  $Rv > 1$ , менее 60 меш  $0 < Rv < 1$ .

Мы можем легко понять изменения текучести с размером частиц, и прийти к решению, что для 60 меш достигается максимальное значение текучести. Другим важным фактором, влияющим на текучесть раствора, является соотношение вода-резина и соотношение вода-цемент. Важным фактором, определяющим соотношение вода-цемент и вода-резина, является гранулометрический состав заполнителя. Все эксперименты показали, что текучесть уменьшается с уменьшением параметров резины. Поэтому оптимальные параметры получаются при 2% резиновой замене.

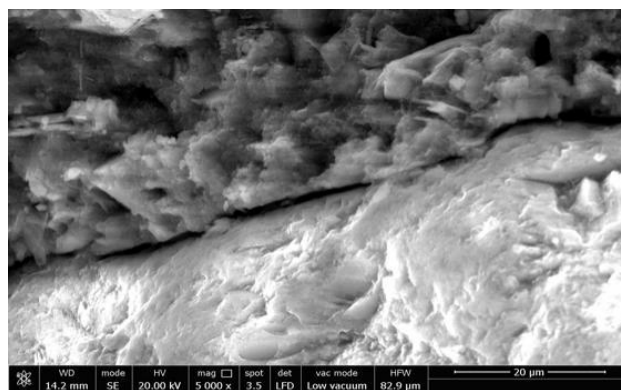
Микроскопический анализ электронного сканирования образцов (SEM)



**Рис. 3а.** SEM изображение поверхности мелкозернистого материала - резиновых частиц. Изображения SEM гидратации цементного раствора на поверхности мелкого заполнителя



**Рис. 3б.** SEM изображение поверхности мелкозернистого материала - резиновых частиц. Изображение SEM гидратации цементного раствора на поверхности резинового порошка



**Рис. 3в.** SEM изображение поверхности мелкозернистого материала - резиновых частиц. Изображение SEM гидратации цементного раствора поверхности тонкого заполнителя - резинового порошка

На рисунке 3 а, б, в, соответственно, показаны SEM-изображения гидратации цементного раствора на поверхности мелкого заполнителя, гидратации цементного раствора, прикрепленного к поверхности резиновых частиц, и изображение SEM после гидратации поверхности тонкого заполнителя и резиновых частиц.

Как видно из рисунка, эффект гидратации мелкозернистой поверхности больше, чем эффект гидратации цемента на поверхности частиц резины, но в поверхности соприкосновения последних существует явный трещины. Состояние поверхности резиновых частиц приводят к рыхлому и неплотному соединению между ними. Вышеприведенный анализ объясняет различия в ранней прочности песчано-резинового заполнителя цементного раствора. Через короткое время после образования цементного раствора, развитие базовых материалов цемента не завершено. При той же дозировке при более крупных резиновых частицах удельная поверхность песчано-резинового заполнителя меньше, чем при меньшем размере частиц резины. Фактическое отношение возрастает. Содержание воды для гидратации цемента больше, чем для мелких частиц резины, что ускоряет гидратацию цемента, поэтому механические свойства относительно хорошие. Однако с увеличением возрастного периода, с дальнейшим развитием гидратации, разви-

тие постепенно завершается. Поскольку площадь контакта каждой крупной частицы резины с цементом больше, чем частицы меньшего размера, ослабление адгезии частиц резины с другими материалами более очевидно, что приводит к уменьшению площади эффективного напряжения (Nell *et al.* 1993).

## Выводы

1. Состояние поверхности резинового порошка и гранулометрического состава будут влиять на текучесть цементного раствора с добавлением резинового порошка. После модификации поверхность резинового порошка с хорошей гидрофильностью может уменьшить потерю воды, что выгодно для рационального распределения воды при условии, что теоретическое соотношение вода-цемент одинаково.
2. Когда размер частиц резинового порошка одинаковый, то, чем меньше дозировка, тем меньше удельная площадь поверхности, тем лучше текучесть раствора, что приводит к более высокой подвижности резинового порошка с меньшей дозировкой. Поэтому соотношение между размером частиц и текучестью по мере увеличения числа меш сначала увеличивается,

а затем уменьшается.

3. Существует хорошая корреляция между текучестью и механической прочностью, которая могут измеряться количественно и анализироваться с использованием математических моделей и функциональных схем. Анализ изображения показывает, что из-за его параболической зависимости хорошие механические участки могут быть получены в рамках определенной текучести. При сочетании анализа изображений влияния дозировки и зернистости на текучесть можно промышленно производить с хорошими механическими свойствами и рабочими характеристиками материалы с содержанием резинового порошка на цементной основе.
4. Из-за физических и химических характеристик резинового порошка его сродство к воде уменьшается, а модификация может привести к изменению состояния поверхности. Дозировка и размер частиц резинового порошка влияют на гранулированный состав мелких частиц заполнителя и оказывают воздействие на удельную площадь поверхности мелкого заполнителя.

## Литература

- Samar, R.; Reyes, G.; *et al.* 2016. Optimisation of Rubberised Concrete with High Rubber Content [J]. *Construction and Building Materials*. 124(2016):391-404.
- Ali, R. K.; Dehestani, M.; *et al.* 2008. Mechanical Properties of Concrete Containing a High Volume of Tire-rubber Particles [J]. *Waste Management*. 28(2008):2471-2482.
- Mansour, F.; Farshad, S. K. 2016. The Effect of Waste Rubber Particles and Silica Fume on the Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete Pavement [J]. *Journal of Cleaner Production*. 129(2016):521-530.
- Linhu, Y. 2010. *Exploration on Microstructure and Structural Theory of Crumb Rubber Concrete*. Tianjin University.
- Shaowen, H.; Yuhua, X.; Qi, L. 2009. Mater Rev [J]. 01:101-105.
- Herna'ndez, O., F.; Baduengaa, G.; Bollatib, M. Static and dynamic Behavior of recycled tyre rubber-filled concrete [J]. *Cement and Concrete research*, 32(10):1587-1596.
- Ligang, Y. 2010. *Hybrid modified waste rubber powder and its influence on the structure and properties of cement-based materials*. South China University of Technology.
- Ligang, Y.; Lan L. 2010. Hybrid Modified Rubber Powder and Its Application in Cement Mortar [J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition)*, 06:1033-1037.
- Hongyin, X.; Qun, Y.; Lingyun, F.; *et al.* 2015. *South-to-North Water Diversion* [J]. 01:136-139.
- Hailong, W.; Xiangdong, S.; Xiaoxiao, W. 2015. *Bull Chin Ceram Soc*, 08:2267-2273.
- Jinhan, L.; Hailong, W.; Yan, W.; *et al.* 2016. *Bull Chin Ceram Soc*, 11:3770-3776.
- Kunlin, M.; Guangcheng, L.; Youjun, X.; *et al.* 2014. *Chin J Ceram Soc*, 08:966-973.
- Yanrong, L.; Shukui, G.; Yu, H. 2014. *Research Progress of Scrap Rubber Powder Modified Cement-based Composites* [J]. S2:422-426.
- Mingli, C.; Ling, X.; Cong, Z. 2016. *Chin J Ceram Soc*. 02:246-252.
- Nell, N. E.; Member, *et al.* Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 5(1993):0899-1561.
- Azevedo, F.; Pacheco-Torgal, F.; Jesus, C.; Barroso de Aguiar, J. L.; Camões, A. F. 2012. Properties and durability of HPC with tyre rubber waste, *Construction and Building Materials* 34: 186–191.
- Atahan, A. O.; Yücel, A. Ö.; 2012. Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation, *Construction and Building Materials* 36: 617–622. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.068>
- Grinys, A.; Sivilevičius, H.; Daukšys, M. 2012. Tyre rubber additive effect on concrete mixture strength, *Journal of Civil Engineering and Management* 18(3): 393–401. <http://dx.doi.org/10.3846/13923730.2012.693536>